レーザースキャナによる
幾何補正手法の精度向上
Accuracy Improvement of Geometric Transformation with Laser Scanner

高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻

社会システム工学コース 1115120

宮崎 倫理

指導教員 高木 方隆 教授

副指導教員 野尻 洋一

論文副審査 藤澤 伸光

論文要旨

レーザースキャナは、広範囲の三次元データを短時間で取得することができるため様々な分野で利用されている。レーザースキャナが取得するデータは、レーザースキャナ自身を原点とする座標である。本研究ではレーザー座標と呼ぶ。レーザー座標は基準点を用いて地上座標に座標変換を行う必要がある。基準点には測量用のプリズムが利用されている。基準点の地上座標はトータルステーションなどの機材を用いて高精度で取得することができる。しかし、レーザースキャナデータの基準点座標は、レーザースキャナに視準装置がないため、付属のソフトを用いて基準点の反射強度が高い座標を自動的に取得し、基準点座標としている。しかし、この手法ではプリズムの中心座標を取得できているとは限らない。付属のソフトを用いて取得した基準点座標の取得精度は大きいときで 10cm 以上の標準偏差がある。そのため、レーザースキャナのデータは高精度に座標変換できていない。

本研究は、レーザースキャナデータの幾何補正の精度を向上させるために、現在レーザスキャナの付属のソフトで行われている基準点座標の取得を自作プログラムにより座標の取得を行い、取得精度を向上させる。また、座標変換モデルに非線形の三次元アフィン変換を用いて精度を向上させることを目的とする。本研究の目標精度は地すべりの変位計測が可能な平均距離誤差 1cm を目標とする。

付属のソフトと自作プログラムによる比較をおこなうため、地すべり現場の実測データより基準点にはプリズム、反射板の各基準点を各 5 点ずつ用いて座標変換における平均距離誤差の比較を行った。地すべり地内に設置されている検証点を対象とした時、反射板を基準点に用いた場合の平均距離誤差は、31.35cm、プリズムを用いた場合、10.57cm となった。反射板を用いるよりもプリズムのほうが誤差は小さくなった。既存の研究より多数の反射板を用いれば高精度座標変換が可能である。しかし、レーザースキャナから約 70m 離れた場所しか設置できないため広範囲の座標変換には適していない。レーザースキャナから 300 m離れた場所に設置できるプリズムの取得精度を向上させることができれば広範囲で高精度座標変換が期待できる。レーザースキャナの基準点座標の取得精度を向上させるために付属のソフトによる取得ではなく、自作プログラムを用いてプリズムの座標取得を行った。プリズムの座標を付属のソフトで取得した場合、標準偏差が最小で 1.54cm、最大で 26.89cm あったものが自作プログラムにより最小で 0.58cm、最大で 4.34cm まで減少させることができている。この精度の高い基準点を用いて座標変換を行った。平均距離誤差は 4.33cm となり精度は向上した。また線形の三次元アフィン変換から非線形の三次元アフィン変換を行ったが 4.69 ｃｍと精度は向上しなかった。プリズムと反射板をあわせて基準点の数を増やし行ったが平均距離誤差は 4.4cm だった。しかし、他の検証点において精度が向上していた。目標精度を達成することはできなかたっが精度は向上することができた。したがってこの手法は効果的になるだろう。

Abstract

The laser scanner is used for various purposes. The laser scanner can acquire three dimensional data in a short time with wide area. The acquired data by the laser scanner has own coordinates. The coordinate is called laser coordinate in this study. The laser coordinate must be transformed into the ground coordinates using control point. The prism is usually used as control point. Control points of ground coordinate can be precisely measured by total station. The laser coordinates of control points cannot be precisely acquired. Because, the laser scanner doesn't have the telescope for collimation. The coordinates of control point are automatically acquired by image processing software of laser scanner. However, center coordinates of prism cannot be acquired in this method. When the prism is used for control point, the acquisition accuracy shows about 10cm or more in standard deviation. Therefore, geometric transform cannot be executed accurately. In this study doesn't acquire the control point with image processing software. The control point coordinates are acquired in self-made program. Moreover, not linear affine-transformation formula but nonlinear affine-transformation formula is used for the geometric transformation formula . And, accuracy will be improved. In this study, The required accuracy is 10mm of average distance error margin for land slide monitoring. Error margins of image processing software and self-made program were compared from the measurement data. The prism and the reflector sheet were used for the control point. When the validation point in landslide ground is targeted, the 5 prism showed 10.57cm average distance error , the 5 reflector sheet showed 31.35cm average distance error. When prism was used as a control point, average distance error has become small more than reflector sheet. From an existing study if a lot of reflector sheets are used, a highly accurate geometric transformation can be done. But reflector sheet can be set up only within the range of 70m from laser scanner.The prism can be set up to the range of over 300m from laser scanner. If the acquisition accuracy of the prism was improved, geometric transformation of the wide area and high accuracy can be expected. The control point coordinates were acquired by self-made program. Standard deviation was minimum 1.54cm, and maximum 26.89cm in the case of image processing software. Standard deviation was minimum 0.58cm, and maximum 4.34cm in the case of self-made program. The self-made program was able to be acquired in high accuracy. The geometric transformation was done by using highly accurate control point. Average distance error was 4.33.The geometric transformation was done by using a nonlinear affine-transformation type. Average distance error was 4.69cm. Accuracy has not improved. When two or more reference points of the prism and the reflector were used, the average distance error margin was 4.4cm. But, accuracy has improved in other validation point. The precision aimed at was not able to be achieved. However, accuracy has improved. Therefore, this geometric transformation method will be effective.

目次

論文要旨 i

Abstract ii

1 **序論** 1
1.1 背景 . . . 1
1.2 研究目的 . . . 1
1.3 使用機器 . . . 2

2 **座標変換手法** 4
2.1 座標変換式 . . . 4
2.2 基準点 . . . 5
2.2.1 プリズム . . . 5
2.2.2 反射板 . . . 6

3 **対象地域** 7

4 **誤差伝播の法則を用いたレーザースキャナデータの座標変換誤差の予測** 8
4.1 座標変換における誤差の予測式の作成 . . . 8
4.2 各基準点を用いた時の座標変換における予測誤差 . . . 10

5 **実測結果** 13
5.1 各基準点を用いたときの座標変換における誤差 . . . 13

6 **高精度化策** 17
6.1 高精度のために必要な基準点取得精度の予測 . . . 17
6.2 基準点の重心を抽出するプログラムの作成 . . . 18
6.2.1 重心抽出プログラムによるレーザースキャナデータの基準点座標の取得 . . . 18
6.2.2 重心抽出プログラムから取得された基準点を用いた座標変換後の検証点の誤差 . . . 19
6.3 非線形の三次元アフィン変換手法 . . . 20
6.3.1 非線形の三次元アフィン変換を用いた座標変換後の検証点の誤差 . . . 21

7 **今後の精度向上のための提案** 24
7.1 複数回計測による誤差の低減 . . . 24

8 **結論** 31

参考文献 32

謝辞 33

付録 A　レーザースキャナが取得するプリズムデータの誤差除去 34
A.1　誤差のおこる仮説 39
A.2　プリズムの直径を小さくした実験 40
A.3　考察 44

付録 B　学会発表論文 45

図目次

図 1.1 LMS-Z210 2
図 1.2 Trimble 5601 3
図 2.1 プリズム 5
図 2.2 反射板 6
図 3.1 長者地すべり現場での設置状況 7
図 5.1 実測誤差と予測誤差との比較（プリズム） 13
図 5.2 実測誤差と予測誤差との比較（反射板 A） 14
図 5.3 実測誤差と予測誤差との比較（反射板 B） 15
図 5.4 実測誤差と予測誤差との比較（複数の基準点） 16
図 6.1 重心抽出プログラムと付属ソフトを用いた場合の誤差の比較 (プリズム) 19
図 6.2 重心抽出プログラムと付属ソフトを用いた場合の誤差の比較 (複数の基準点) 20
図 6.3 線形と非線形を用いた座標変換の誤差の比較 (プリズム) 22
図 6.4 線形と非線形を用いた座標変換の誤差の比較 (複数の基準点) 23
図 7.1 複数回計測による検証点 1 の予測誤差 (基準点：プリズム) 24
図 7.2 複数回計測による検証点 2 の予測誤差 (基準点：プリズム) 25
図 7.3 複数回計測による検証点 3 の予測誤差 (基準点：プリズム) 25
図 7.4 複数回計測による検証点 4 の予測誤差 (基準点：プリズム) 26
図 7.5 複数回計測による検証点 5 の予測誤差 (基準点：プリズム) 26
図 7.6 複数回計測による検証点 6 の予測誤差 (基準点：プリズム) 27
図 7.7 複数回計測による検証点 1 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板) 27
図 7.8 複数回計測による検証点 2 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板) 28
図 7.9 複数回計測による検証点 3 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板) 28
図 7.10 複数回計測による検証点 4 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板) 29
図 7.11 複数回計測による検証点 5 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板) 29
図 7.12 複数回計測による検証点 6 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板) 30
図 A.1 誤差の分布（2.01m） 34
図 A.2 誤差の分布（4.03m） 34
図 A.3 誤差の分布（6.01m） 35
図 A.4 誤差の分布（8.00m） 35
図 A.5 誤差の分布（16.00m） 36
図 A.6 誤差の分布（28.01m） 36
図 A.7 直径の大きさによる誤差の比較図 40
図 A.8 直径の大きさによる誤差の比較図 40
図 A.9 レーザースキャナとプリズムの開口度の概念 41
図 A.10 各距離の誤差の比較図 44

表目次

表 1.1 LMS-Z210 距離計測器性能（カタログ値） 2
表 1.2 LMS-Z210 スキャニング性能（カタログ値） 3
表 2.1 プリズムより得られた座標 5
表 2.2 反射板より得られた座標 6
表 4.1 プリズムを基準点に用いて座標変換した検証点の予測誤差 11
表 4.2 反射板 A を基準点に用いて座標変換した検証点の予測誤差 11
表 4.3 反射板 B を基準点に用いて座標変換した検証点の予測誤差 12
表 4.4 複数の基準点を用いて座標変換した検証点の予測誤差 12
表 5.1 プリズムを基準点に用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差 13
表 5.2 反射板 A を基準点に用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差 14
表 5.3 反射板 B を基準点に用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差 15
表 5.4 複数の基準点を用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差 16
表 6.1 レーザースキャナが取得した各プリズムの基準点座標の標準偏差 17
表 6.2 座標変換後の予測誤差（6） 17
表 6.3 重心抽出プログラムより取得した各プリズムの標準偏差 18
表 6.4 重心抽出プログラムより取得した基準点を用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差（プリズム） 19
表 6.5 重心抽出プログラムより取得した基準点を用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差（複数の基準点） 20
表 6.6 非線形の変換式を用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差（プリズム） . . 21
表 6.7 非線形の変換式を用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差 (複数の基準点） 22
表 A.1 2.01m に設置したプリズムの平均二乗誤差 37
表 A.2 4.03m に設置したプリズムの平均二乗誤差 37
表 A.3 6.01m に設置したプリズムの平均二乗誤差 38
表 A.4 8.00m に設置したプリズムの平均二乗誤差 38
表 A.5 16.00m に設置したプリズムの平均二乗誤差 39
表 A.6 28.01m に設置したプリズムの平均二乗誤差 39
表 A.7 4.01m に設置したプリズムの誤差 41
表 A.8 6.00m に設置したプリズムの誤差 42
表 A.9 16.00m に設置したプリズムの平均二乗誤差 42
表 A.10 28.00m に設置したプリズムの平均二乗誤差 43
表 A.11 8.00m に設置したプリズムの平均二乗誤差 43

1 序論

1.1 背景

レーザースキャナは広範囲の三次元データを短時間で取得することができるため、様々な分野で利用されている。しかし、レーザースキャナ計測には大きく分けて三つの問題点がある。一つ目はレーザースキャナが取得するデータにはランダムな誤差が含まれることである。レーザースキャナを用いて近距離に設置させた平坦な表面を持つ対象物に対して計測を行っても、その表面には凸凹が存在する。この問題は、計測精度（標準偏差 2.5cm）が原因だと思われる。この問題を解決するため 2005 年度坂井知也修士論文「レーザーキャナを用いた平面計測における誤差分布モデルの構築」にて、室内実験で平面を計測し、256 点以上の点データを取得することができれば誤差量を 1cm 未満でレーザースキャナデータの平面を作成できることを実証した。

二つ目の問題点は、セッティングの再現性である。レーザースキャナ本体のセッティングを再現することは難しいため、取得したデータの三次元座標の座標系が異なってしまっている。xy 軸方向（水平方向）については、計測器具を整準するための整準台をしようすることにより高精度で再現できるが、z 軸方向（鉛直方向）については、整準するための器具が存在しないため再現することが困難である。セッティング誤差を減少させるためには同じ場所に設置できるように目印をおいておくことが重要である。

三つ目の問題点は、レーザースキャナが取得する基準点の問題である。レーザースキャナが取得するデータは計測毎ごとに座標軸が異なっているため多時期のデータを比較することができない。比較するためには、座標系を統一する必要がある。座標変換を行うために、あらかじめ現地に基準点となるプリズムや反射板を設置し、GPS やトータルステーションなどの機材を用いて、各基準点の地上座標を精密に計測しておく。その後、レーザースキャナでプリズム、反射板を含めた対象地域のデータを取得する。この時、取得されるデータは、レーザースキャナ本体を原点とするレーザー座標系である。このときの基準点座標の取得精度が、座標変換の誤差に直接影響する。しかし、レーザースキャナは視準装置が存在しないため、基準点の座標を正確に取得することができない。そのため、座標変換時に必要な基準点座標は、レーザースキャナの付属のソフトを用いて反射強度により自動取得される。しかし、この方法では、現在基準点としているプリズムの基準点座標の取得精度に 10cm 以上の標準偏差がある。2007 年度木下和修士論文「レーザースキャナデータの高精度幾何補正手法の開発」でプリズム、反射板、平面を利用して仮想的な基準点を作成する手法を用いて各基準点による座標変換誤差を検証し、多数の射板を用いて複数回計測することで座標変換誤差を小さくできることを実証した。今後の課題としてレーザー座標の基準点の取得精度、変換式モデル式による精度向上を行う必要がある。

1.2 研究目的

本研究では、レーザースキャナの付属ソフトを用いて行っている基準点座標の取得を自作プログラムを用いて行う。また、線形で行われている変換式を非線形を用いることで精度を向上させることができるのかを検討する。レーザー座標の基準点の取得の精度を向上させることができれば、高精度に座標変換することができるようになり、地すべりの挙動を把握することが可能になってくる。現在、研究室で使われているプリズムを用いた座標変換における誤差は 10cm 以上ある。そのため、地すべりの挙動把握に必要な精度 1cm を目標精度とする。

1.3 使用機器

本研究で使用したレーザースキャナは RIGL 社から販売されている「LMS-Z210」（図 A.6）である。

図 1.1 LMS-Z210

LMS-Z210 における計測システムでは、赤外波長の短いレーザーパルスの飛行時間を計測することにより距離を決定している。また、その距離計測と同時に、ポリゴンミラーの回転により、ラインスキャン角（縦方向）を、光学ヘッドの回転によりフレームスキャン角（横方向）を計測する。計測された距離、水平角、鉛直角を基に LMS-Z210 内部を原点とする三次元座標（レーザー座標）を算出する。LMS-Z210 が一度に取得することができるポイント数は最大で約 511 万点で、所要時間は約 15 分で取得することができる。LMS-Z210 により、取得することができるデータは、対象物までの距離、角度、反射強度、カラー情報である。これらのデータは、LMS-Z210 に付属されているソフト（3D-RiSCAN）により、三次元座標への変換を容易に行うことができる。　LMS-210Z の性能を表 1.1、1.2 までに示す。

表 1.1 LMS-Z210 **距離計測器性能（カタログ値）**

計測距離範囲	350m(反射率 80 %の自然物） 150m(反射率 10 %の自然物）
最短距離	2m
計測精度	± 2.5cm
レーザー波長	0.9 μ m（近赤外線）

表 1.2 LMS-Z210 スキャニング性能（カタログ値）

スキャニング方向	ラインスキャン（縦方向）	フレームスキャン（横方向）
スキャニング数	111 ～ 1106	463～4621
スキャニング範囲	± 40 ° = 80 ° total	0 ° ～ 333 °
スキャニング機構	回転ポリゴンミラー	回転光学ヘッド
スキャニング速度	5line/s ～ 52line/s	1 °/s ～ 15 °/s
角度ステップ幅	0.24 °	0.24 °
角度分解能	0.036 °	0.018 °

座標変換を行うために、地上座標とレーザー座標の基準点座標を取得しなければならない。基準点の地上座標は、ニコントリンブル社製のトータルステーション Trimble5601 を使用した（図 1.2）。測距精度が標準偏差で 3mm、角度分解能が 1 ″（2.777×10^{-4} °）の高精度のトータルステーションである。

図 1.2 Trimble 5601

2　座標変換手法

レーザースキャナが取得する座標はレーザースキャナ自身を原点とする座標であるため、地上座標に座標変換する必要がある。座標変換をおこなうためにはレーザースキャナが取得するデータの範囲に基準点を設置し、その基準点のレーザー座標と地上座標を用いて座標変換を行う。

2.1　座標変換式

本研究で使用している座標変換式は, 線形の三次元アフィン変換である。線形の三次元アフィン変換は、最低 4 点の基準点より座標変換を次式から行うことができる（式 2.1)。

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_0 & p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 & p_5 \\ p_6 & p_7 & p_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

(X_i, Y_i, Z_i):基準点座標（地上座標）

(u_i, v_i, w_i):基準点座標（レーザー座標）

$(p_0$〜$p_8)$:変換パラメータ

(X_0, Y_0, Z_0):レーザースキャナの設置座標（地上座標）

トータルステーションより取得した基準点の地上座標 (X_i, Y_i, Z_i) とレーザー座標の基準点座標 (u_i, v_i, w_i) を用いて、変換パラメータ $(p_0$〜$p_8)$、X_0, Y_0, Z_0 を最小二乗法により算出する。最小二乗法を用いて p_0〜p_8、X_0, Y_0, Z_0 を求める式は次式である。

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ X_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma\ u_i^2 & \Sigma\ u_i v_i & \Sigma\ u_i w_i & \Sigma\ u_i \\ \Sigma\ u_i v_i & \Sigma\ v_i^2 & \Sigma\ u_i w_i & \Sigma\ v_i \\ \Sigma\ u_i w_i & \Sigma\ v_i w_i & \Sigma\ w_i^2 & \Sigma\ w_i \\ \Sigma\ u_i & \Sigma\ v_i & \Sigma\ w_i & n \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Sigma\ X_i u_i \\ \Sigma\ X_i v_i \\ \Sigma\ X_i w_i \\ \Sigma\ X_i \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

n:データ数

$$\begin{pmatrix} a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ Y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma\ u_i^2 & \Sigma\ u_i v_i & \Sigma\ u_i w_i & \Sigma\ u_i \\ \Sigma\ u_i v_i & \Sigma\ v_i^2 & \Sigma\ u_i w_i & \Sigma\ v_i \\ \Sigma\ u_i w_i & \Sigma\ v_i w_i & \Sigma\ w_i^2 & \Sigma\ w_i \\ \Sigma\ u_i & \Sigma\ v_i & \Sigma\ w_i & n \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Sigma\ Y_i u_i \\ \Sigma\ Y_i v_i \\ \Sigma\ Y_i w_i \\ \Sigma\ Y_i \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

$$\begin{pmatrix} a_7 \\ a_8 \\ a_9 \\ Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma\ u_i^2 & \Sigma\ u_i v_i & \Sigma\ u_i w_i & \Sigma\ u_i \\ \Sigma\ u_i v_i & \Sigma\ v_i^2 & \Sigma\ u_i w_i & \Sigma\ v_i \\ \Sigma\ u_i w_i & \Sigma\ v_i w_i & \Sigma\ w_i^2 & \Sigma\ w_i \\ \Sigma\ u_i & \Sigma\ v_i & \Sigma\ w_i & n \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Sigma\ Z_i u_i \\ \Sigma\ Z_i v_i \\ \Sigma\ Z_i w_i \\ \Sigma\ Z_i \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

式 2.2〜2.4 の連立方程式を解けば、最確値となる p_0〜p_8、X_0, Y_0, Z_0 を求めることができる。

2.2 基準点

2.2.1 プリズム

レーザースキャナ計測の基準点として測量用のプリズムがよく使われている。本研究ではソキア製の APS 素子 AP 反射プリズムを使用した（図 2.1）。

図 2.1 プリズム

プリズムはレーザー光を強く反射することができるためレーザースキャナから遠い場所（約 300 m以上）に設置することができる。しかし、１台１０万円以上と非常に高価なため、大量に設置することが困難である。プリズムのレーザー座標の基準点は、レーザスキャナ付属のソフトを用いて反射強度により取得することができる。しかし、反射強度の強い場所の座標を取得するためプリズムの中心座標を取得できておらず、高精度で取得できていないのが現状である。レーザースキャナより取得された約 58 mに設置されたプリズムの標準偏差を表 2.1 に示す。同じ状況で 10 回スキャニングしたデータである。距離の標準偏差は 1.1cm であったが u, v, w軸 1.54cm〜5.92cm の標準偏差があった。また、遠距離に設置したプリズムでは u, v, w軸に 10cm 以上の標準偏差がある。

表 2.1 プリズムより得られた座標

	u(m)	v(m)	w(m)	距離 (m)
scan1	-56.177	-16.194	0.050	58.464
scan2	-56.189	16.087	0.048	58.447
scan3	-56.214	-16.095	-0.031	58.472
scan4	-56.190	-16.139	0.060	58.461
scan5	-56.190	-16.165	0.076	58.469
scan6	-56.201	-16.073	0.031	58.455
scan7	-56.155	-16.201	0.100	58.446
scan8	-56.178	-16.219	0.073	58.472
scan9	-56.194	-16.156	0.073	58.471
scan10	-56.202	-16.029	0.029	58.443
標準偏差	0.015	0.059	0.034	0.011

2.2.2 反射板

反射板はプリズムと同様にレーザー光を反射することができる。本研究で使用した反射板はソキア製の「RS70N － K」である（図 2.2)。

図 2.2 反射板

反射板の利点は、1 枚１５００円以下とプリズムに比べると安く、大量に設置することが可能で、三脚といった土台を設置する必要がなく、幅広く設置ができる。しかし、プリズムよりも反射強度が低いため、70 m 以内の場所に設置しなければならない。反射板のレーザー座標の基準点座標は、プリズムと同様にレーザースキャナ付属のソフトを用いて取得を行った。レーザースキャナより取得された反射板の標準偏差を表 2.2 に示す。同じ状況で 10 回スキャニングしたデータである。距離の標準偏差は 0.7cm、u, ｖ, w軸 0.86cm～1.70cm の標準偏差であった。プリズムよりも誤差のバラつきが少ない。

表 2.2 反射板より得られた座標

	u(m)	v(m)	w(m)	距離 (m)
scan1	-29.848	49.610	-6.276	57.843
scan2	-29.854	49.588	-6.302	57.827
scan3	-29.866	49.583	-6.304	57.829
scan4	-29.829	49.600	-6.293	57.824
scan5	-29.861	49.572	-6.285	57.817
scan6	-29.880	49.574	-6.297	57.828
scan7	-29.864	49.584	-6.298	57.828
scan8	-29.860	49.577	-6.299	57.820
scan9	-29.875	49.577	-6.305	57.828
scan10	-29.864	49.573	-6.301	57.834
標準偏差	0.017	0.012	0.009	0.007

3　対象地域

研究室では地すべり観測対象地区として、高知県吾川郡淀川町長者を定期的に観測している。本研究ではその対象地域の観測データを用いた。プリズムと反射板が幅広く設置されている 2007 年 12 月 25 日の長者地すべり地の実測データを用いて、プリズムと反射板、それぞれの基準点を用いた座標変換後の検証点の比較を行った。地すべり現場での設置状況を（図 3.1）で示す。

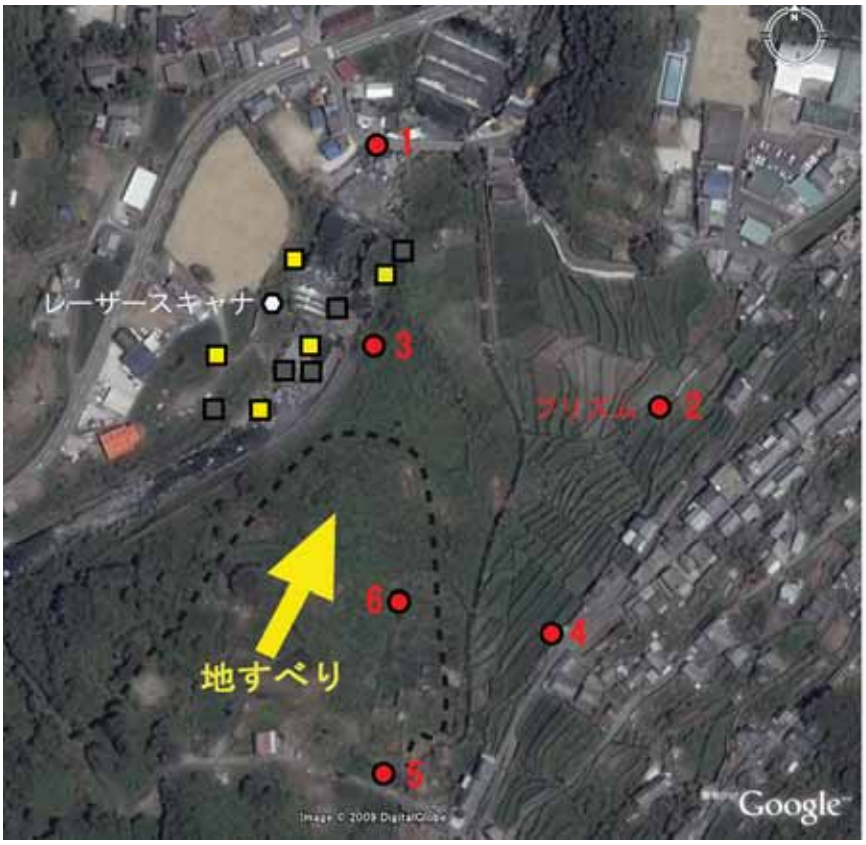

図 3.1 長者地すべり現場での設置状況

レーザースキャナは、地すべりの末端部分にある護岸ブロックの向かい側にある堤防に設置した。基準点として用いるプリズムは広範囲に計 6 箇所に設置している。反射シートは 70 mの範囲内に合計 10 枚設置されている。今回座標変換後の誤差を検証する検証点には各基準点ポイントに設置されているプリズムを用いて行った。プリズムを基準点に用いた座標変換では、基準点に 5 個使用し、残りの 1 個を検証点として使用している（例：1 を検証点とした場合は残りの 5 個を基準点）。また反射板は、灰色で配置された反射板と黄色で配置された反射板の 2 つの配置方法を用いて座標変換を行った。本研究では灰色で配置された反射板のグループを反射板 A、黄色の配置の反射板のグループを反射板 B と呼ぶ。複数の基準点用いた場合の精度をみるためにプリズムと反射板の計 15 点の基準点を用いた座標変換を行った。計測は同じ状況で 10 回のスキャニング行った。

4　誤差伝播の法則を用いたレーザースキャナデータの座標変換誤差の予測

座標変換における誤差を予測するために、予測式を作成した。レーザースキャナの三次元データの座標変換における誤差要因は、レーザースキャナが取得する座標の誤差である機械の性能による誤差と座標変換式による誤差の要因がある。誤差伝播の法則を用いれば、それぞれの誤差を含んだ式を求めることができ、レーザースキャナの座標変換時における誤差を予測することができる。

4.1　座標変換における誤差の予測式の作成

レーザースキャナの座標変換は三次元で行われているが、三次元の変換式を用いた誤差伝播式は非常に難しいため、本研究では二次元において誤差予測式を作成した。今回誤差の要因は地上座標にはないものとし、レーザースキャナが取得する座標にあると考え、誤差の予測式を作成している。二次元の座標変換式は次式を用いて表すことができる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} \tag{4.1}$$

X, Y:基準点座標（地上座標）
uv:基準点座標（レーザー座標）
a, b, c, d:変換パラメータ
X_0, Y_0:レーザースキャナの設置座標（地上座標）

式 4.1 を X, Y をそれぞれ展開し、誤差伝播の法則を用いて解くと X, Y の誤差予測式は次式なる

$$\sigma_X^2 = a^2 \sigma_u^2 + b^2 \sigma_v^2 + u^2 \sigma_a^2 + v^2 \sigma_b^2 \tag{4.2}$$

σ_X:基準点座標 X の誤差（地上座標）
σ_u, σ_v:基準点座標 u, v の誤差（レーザー座標）
σ_a, σ_b:変換パラメータ a, b の誤差

$$\sigma_Y^2 = c^2 \sigma_u^2 + d^2 \sigma_v^2 + u^2 \sigma_c^2 + v^2 \sigma_d^2 \tag{4.3}$$

σ_Y:基準点座標 Y の誤差（地上座標）
σ_c, σ_d:変換パラメータ a, b の誤差

誤差伝播の法則を用いた変換の誤差予測式には、a, b, c, d, u, v の誤差が含まれているため、各々の誤差を求める必要がある。

レーザー座標 u, v はレーザースキャナ計測により得られる距離、角度により次式より算出されている。

$$u = r sin\ \lambda\ cos\ \phi \tag{4.4}$$

$$v = r sin\ \lambda\ sin\ \phi \tag{4.5}$$

r:距離 (m)
ϕ:水平角（°）
λ:天頂角（°）

しかし、u、v それぞれの式にも誤差は含まれている。誤差は距離計測と角度である。距離はレーザースキャナより発射されるレーザーパルスの飛行時間を計測し、距離を計算している。しかし、距離計測には標準偏差で 2.5cm の誤差が含まれている。距離計測による誤差と角度の誤差を含んだ u, v の誤差を求める式は、次式である。今回、角度の誤差には角度分解能の 10 分の 1 を用いた。

$$\sigma_u = \sqrt{(sin\ \lambda\ cos\ \phi)^2 \sigma_r^2 + (r cos\ \lambda\ cos\ \phi)^2 \sigma_\lambda^2 + (r sin\ \lambda\ (-sin\ \phi))^2 \sigma_\phi^2} \tag{4.6}$$

$$\sigma_u = \sqrt{(sin\ \lambda\ sin\ \phi)^2 \sigma_r^2 + (r cos\ \lambda\ sin\ \phi)^2 \sigma_\lambda^2 + (r sin\ \lambda\ cos\ \phi)^2 \sigma_\phi^2} \tag{4.7}$$

$\sigma\ r$:距離計測による誤差
$\sigma\ \lambda$:天頂角の誤差
$\sigma\ \phi$:水平角度の誤差

次に a, b, c, d を求める式は 4.1 より次式で求めることができる。

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 & v_1 \\ u_2 & v_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X_1 - X_0 \\ X_2 - X_0 \end{pmatrix} \tag{4.8}$$

$$\begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 & v_1 \\ u_2 & v_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Y_1 - Y_0 \\ Y_2 - Y_0 \end{pmatrix} \tag{4.9}$$

式 4.8,4.9 を最小二乗法により解くと以下の式を得ることができる。

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma\ u_i^2 & \Sigma\ (u_i v_i) \\ \Sigma\ (u_i v_i) & \Sigma\ v_i^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Sigma\ u_i (X_i - X_0) \\ \Sigma\ v_i (X_i - X_0) \end{pmatrix} \tag{4.10}$$

$$\begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma\ u_i^2 & \Sigma\ (u_i v_i) \\ \Sigma\ (u_i v_i) & \Sigma\ v_i^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Sigma\ u_i (Y_i - Y_0) \\ \Sigma\ v_i (Y_i - Y_0) \end{pmatrix} \tag{4.11}$$

i:データ数

式 4.11 を用いて a について展開した式は次式となる。

$$a = \frac{\Sigma\ v_i^2 (\Sigma\ u_i X_i - \Sigma\ u_i X_0) - \Sigma\ u_i v_i (\Sigma\ v_i X_i - \Sigma\ v_i X_0)}{\Sigma\ u_i^2 \Sigma\ v_i^2 - (\Sigma\ u_i \Sigma\ v_i)^2} \tag{4.12}$$

式 4.12 に含まれている誤差 σ_u、σ_v は式 4.6 式、4.7 で求められているので誤差伝播の法則を用いて a の誤差を求める式は、以下の式である（式 4.13）。

$$\sigma_a^2 = \left[\frac{\{\Sigma v_i^2(X_i - X_0) - v_i(\Sigma v_i X_i - \Sigma v_i X_0)\}\{\Sigma u_i^2 \Sigma v_i^2 - (\Sigma u_i \Sigma v_i)^2\}^2}{\{\Sigma u_i^2 \Sigma v_i^2 - (\Sigma u_i \Sigma v_i)^2\}^2} - \frac{\{\Sigma v_i^2(\Sigma u_i X_i - \Sigma u_i X_0) - \Sigma u_i v_i(\Sigma v_i x_i - \Sigma v_i x_0)\}\{2u_i \Sigma v_i^2 - 2v_i(\Sigma u_i v_i\}]}{\{\Sigma u_i^2 \Sigma v_i^2 - (\Sigma u_i \Sigma v_i)^2\}^2}\right]^2 \times \sigma u_i^2 + \left[\frac{\{2v_i \Sigma u_i(X_i - X_0) - u_i \Sigma v_i(X_i - X_0) + \Sigma u_i v_i(X_i - X_0)\}\{\Sigma u_i^2 \Sigma v_i^2 - (\Sigma u_i \Sigma v_i)^2\}^2}{\{\Sigma u_i^2 \Sigma v_i^2 - (\Sigma u_i \Sigma v_i)^2\}^2} + \frac{\{\Sigma v_i^2(\Sigma u_i X_i - \Sigma u_i X_0) - \Sigma u_i v_i(\Sigma v_i x_i - \Sigma v_i x_0)\}\{2v_i \Sigma u_i^2 - 2u_i(\Sigma u_i v_i\}]}{\{\Sigma u_i^2 \Sigma v_i^2 - (\Sigma u_i \Sigma v_i)^2\}^2}\right]^2 \times \sigma v_i^2 \tag{4.13}$$

同様に b, c, d についても式 4.8、4.9 を展開し、誤差伝播の法則を用いて $\sigma_b, \sigma_c, \sigma_d$ を求めることができる。求めた各誤差を用いて、式 4.2 と 4.3 に代入することで X, Y の誤差を予測することができる。

また検証点と座標変換後の距離誤差を求める式は次式である。

$$ed = \sqrt{(X_v - X_s)^2 + (Y_v - Y_s)} \tag{4.14}$$

ed:距離誤差
X_v:座標変換後の X の地上座標
Y_v:座標変換後の Y の地上座標
X_s:真値とする X の地上座標
Y_s:真値とする Y の地上座標

X_v、Y_v の誤差は式 4.2、4.3 より求めることができる。誤差伝播の法則より 4.15 を求めた。

$$\begin{aligned}\sigma_{ed}^2 = &[\{(X_v - X_s)^2 + (Y_v - Y_s)\}^{-\frac{1}{2}} \times (X_v - X_s)]^2 \times \sigma_{X_v}^2 \\ &+[\{(X_v - X_s)^2 + (Y_v - Y_s)\}^{-\frac{1}{2}} \times (Y_v - Y_s)]^2 \times \sigma_{Y_v}^2\end{aligned} \tag{4.15}$$

作成した式を用いてレーザースキャナの座標変換後の検証点の誤差を予測する。

4.2 各基準点を用いた時の座標変換における予測誤差

プリズム、反射板 A、B, プリズムと反射板の各基準点を用いた座標変換後の誤差を誤差の予測式より予測した。誤差の予測式 4.2 と 4.3、4.14 を用いて各検証点の誤差を予測した。

表 4.1 プリズムを基準点に用いて座標変換した検証点の予測誤差

検証点	X(cm)	Y(cm)	水平距離 (cm)
1	21.77	21.44	21.62
2	36.19	41.48	40.66
3	8.42	9.78	9.78
4	34.98	40.71	40.66
5	42.66	45.89	43.31
6	27.00	30.04	27.50

表 4.2 反射板 A を基準点に用いて座標変換した検証点の予測誤差

検証点	X(cm)	Y(cm)	水平距離 (cm)
1	17.72	15.19	15.81
2	34.17	36.95	34.38
3	9.17	10.06	9.95
4	37.06	40.99	40.99
5	42.61	43.25	42.97
6	27.84	29.45	29.41

表 4.3 反射板 B を基準点に用いて座標変換した検証点の予測誤差

検証点	X(cm)	Y(cm)	水平距離 (cm)
1	17.84	15.46	17.08
2	36.64	38.79	36.68
3	9.88	10.57	10.54
4	40.03	43.11	42.87
5	44.82	45.08	44.90
6	29.65	30.83	30.47

表 4.4 複数の基準点を用いて座標変換した検証点の予測誤差

検証点	X(m)	Y(m)	水平距離 (cm)
1	18.43	17.18	17.66
2	31.28	35.75	34.00
3	8.11	9.43	9.48
4	33.66	39.21	39.20
5	39.19	41.89	39.27
6	25.56	28.45	25.89

予測誤差の結果は、どの基準点においても検証点 3、1、6、2、4、5 の順で精度が悪いという傾向がみられた。多数の基準点を用いた場合、1 以外はどの基準点よりも誤差が少ない結果となっている。

5　実測結果

5.1　各基準点を用いたときの座標変換における誤差

実測におけるプリズム、反射板の各基準点と複数の基準点を用いた座標変換の検証点における平均二乗誤差と平均距離誤差を表 5.1～表 5.4 に示す。また、実測誤差と予測誤差を相対的にだした図を図**??**～図 5.4 で示す。相対的にみることで傾向から誤差の予測式と実測との正確差を見比べた。今回は二次元での予測式であるため実測誤差からは水平距離の誤差を使用した。

表 5.1 プリズムを基準点に用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差

検証点	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	斜距離 (cm)	水平距離 (cm)
1	16.61	8.61	14.62	23.37	17.67
2	81.46	36.63	58.79	102.26	80.43
3	8.31	5.44	8.57	12.63	8.96
4	53.30	25.16	43.11	71.95	55.47
5	15.43	7.55	11.42	19.30	15.15
6	8.59	5.75	7.33	10.57	8.40

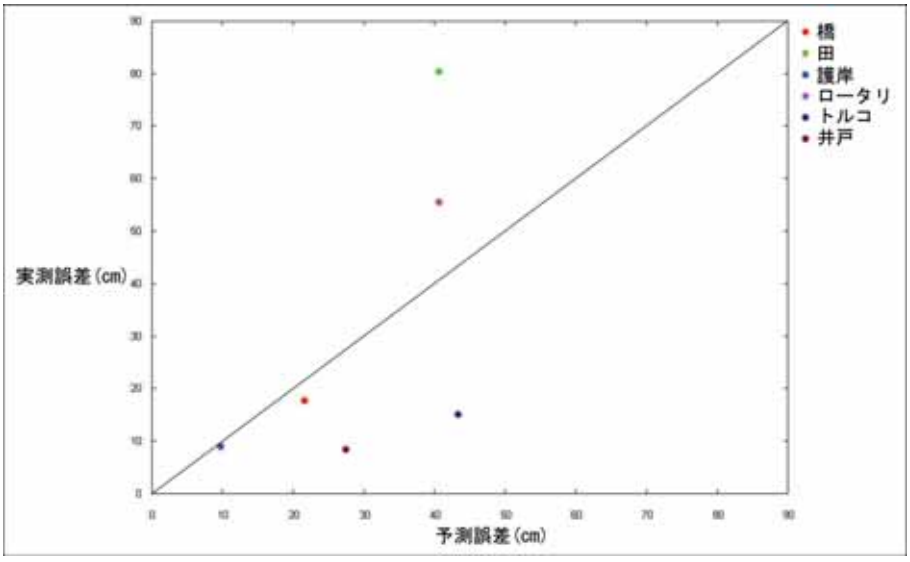

図 5.1 実測誤差と予測誤差との比較（プリズム）

表 5.2 反射板 A を基準点に用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差

検証点	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	斜距離 (cm)	水平距離 (cm)
1	10.03	8.07	8.38	14.90	12.35
2	25.33	15.20	10.19	28.47	26.00
3	9.01	11.17	5.08	14.38	13.50
4	34.26	47.20	19.36	59.56	56.62
5	28.93	32.56	11.32	43.20	41.38
6	20.34	23.19	9.97	31.35	29.88

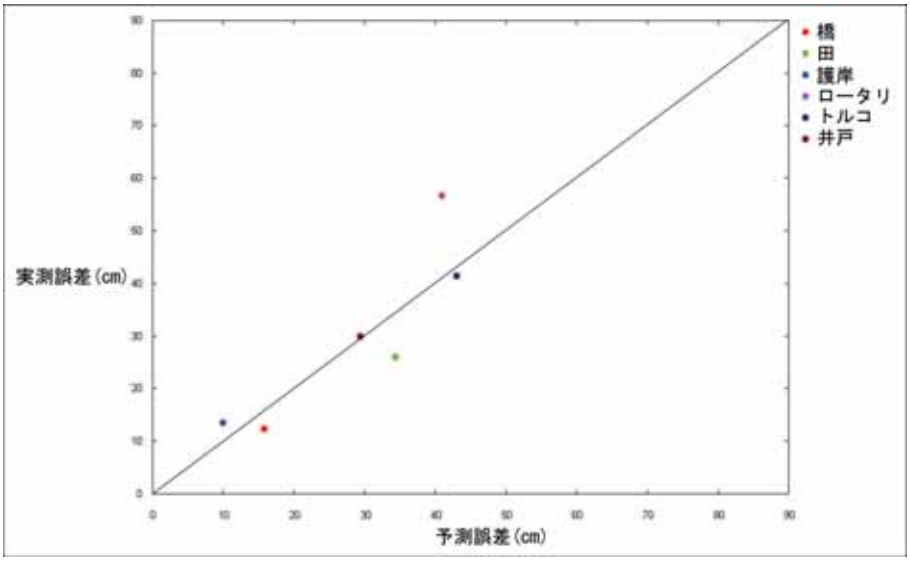

図 5.2 実測誤差と予測誤差との比較（反射板 A）

表 5.3 反射板 B を基準点に用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差

検証点	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	斜距離 (cm)	水平距離 (cm)
1	10.31	6.57	7.07	12.96	11.21
2	14.75	39.66	17.47	35.90	33.46
3	8.37	12.21	4.68	13.95	13.15
4	28.29	60.34	21.84	66.57	61.34
5	27.96	45.20	21.64	55.80	50.79
6	18.57	31.83	14.42	37.67	34.49

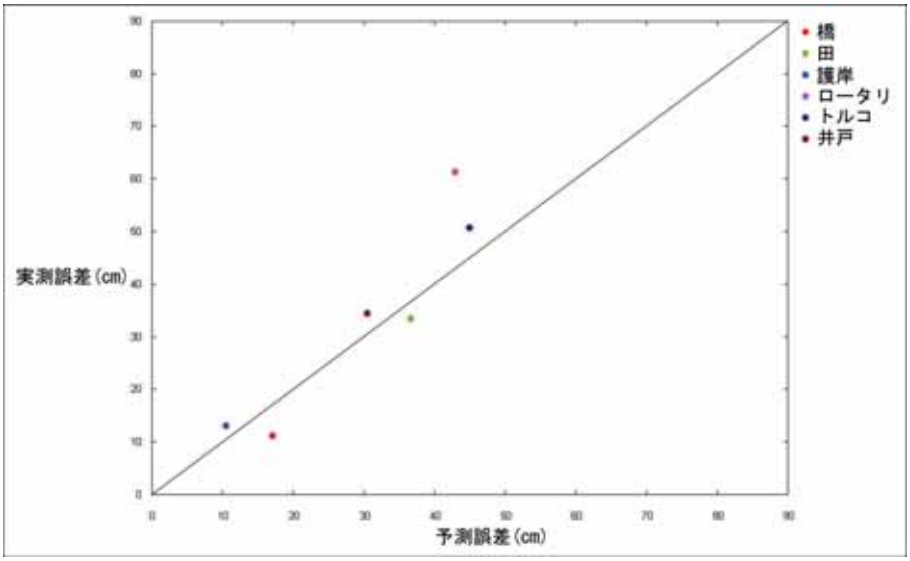

図 5.3 実測誤差と予測誤差との比較（反射板 B）

表 5.4 複数の基準点を用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差

検証点	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	斜距離 (cm)	水平距離 (cm)
1	6.55	5.97	6.68	10.67	8.34
2	5.65	9.97	5.64	12.04	10.62
3	4.97	5.60	4.38	8.09	6.85
4	5.66	8.84	5.95	11.41	9.62
5	6.41	3.65	4.91	8.20	6.49
6	5.26	3.10	5.57	6.71	4.73

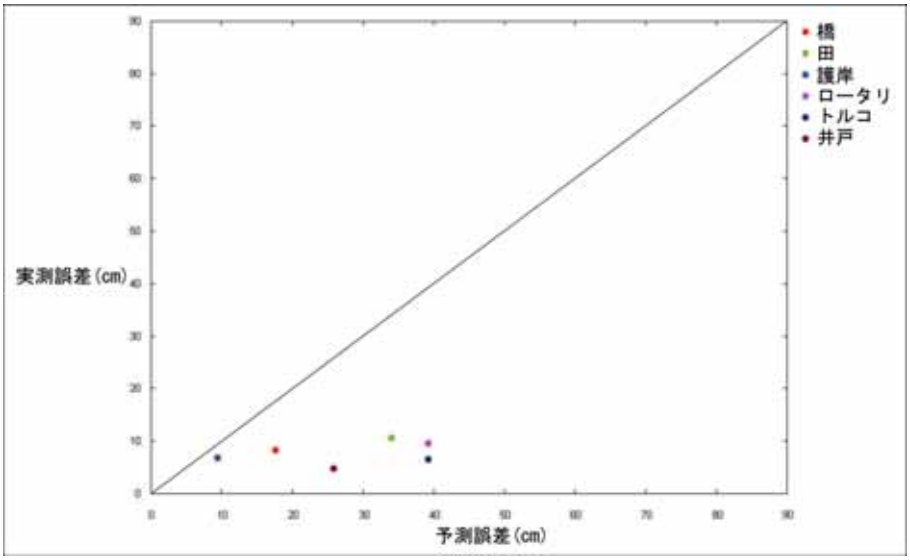

図 5.4 実測誤差と予測誤差との比較（複数の基準点）

プリズムを基準点として用いた場合、検証点における平均距離誤差の最小は3 の検証点で 12.63c m、最大は検証点の 2 で 102.63cm の誤差がある。最も誤差の大きかった検証点の 2 では X 座標の平均二乗誤差が 80.43 mと他の検証点に比べても誤差のばらつきが非常に大きかった。　反射板を基準点として用いた場合、反射板 A の平均距離誤差の最小は 3 の 14.38c m、最大は 4 の 59.56c mであり、反射板 B では最小は 1 の 12.96 m、最大は 4 の 66.57c mであった。反射板 A と反射板 B を見比べてみると検証点 3 側に設置されている反射板を基準点に用いた反射板 A のほうがレーザースキャナの周りに設置された反射板を基準点に用いた反射板 B よりも 3、4、5、6 の平均距離誤差は少なかった。これは基準点の設置による影響だと思われる。プリズムの予測誤差と実測誤差では 4 と 2 以外は予測誤差よりも良いという傾向が見られている。今回角度の誤差に角度分解能の 10 分の 1 を用いていることから 10 分の 1 よりも良い精度で取得されているのではないかと考えられる。2、5 では精度の高い基準点よりも精度の悪い基準点の偏りがおおきいため精度が悪くなったのかもしれない。予測誤差の比較では反射板 A・B はどの検証点においても実測と予測誤差に同じような傾向が見られた。10 分の 1 の精度で取得されていると考えられる。多数の基準点を用いた場合、全ての検証点の誤差は実測のほうが予測誤差よりも良いものとなっている。

6　高精度化策

長者地すべり地で重要となる検証点は、地すべりの範囲内に設置されている 6 である。この検証点を精度よく取得することができれば、地すべりの変位抽出が可能となってくる。今回の実測においてプリズムを基準点とした場合、反射板を基準点とした場合よりも誤差は小さかった。プリズムは、反射板よりも広範囲に設置することができる。もし、プリズムを用いて精度の高い座標変換ができれば、広範囲で精度の高いデータを取得することができる。

6.1　高精度のために必要な基準点取得精度の予測

レーザースキャナより取得したプリズムの標準偏差を用いて誤差の予測式より、どれくらい基準点の取得精度を上げれば座標変換後の距離誤差がレーザースキャナの距離計測精度 1cm で取得できるかを誤差の予測式より計算した。レーザースキャナが取得する各プリズムの座標の 10 回分の標準偏差を表 6.1 で示す。また、各プリズムの標準偏差を 2 分の 1、4 分の 1、6 分の 1、8 分の 1、10 分の 1 と減少させていったときどの位の精度があれば検証点 6 の平均距離誤差が目標精度 1cm になるのか予測式より予測した結果を表 6.2 に示す。

表 6.1 レーザースキャナが取得した各プリズムの基準点座標の標準偏差

基準点	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)
1	11.89	1.70	6.75
2	6.61	13.03	7.67
3	1.54	5.92	3.42
4	3.47	26.89	14.43
5	6.23	14.76	8.84
6	12.98	19.95	11.31

表 6.2 座標変換後の予測誤差（6）

等比	X(cm)	Y(cm)	距離誤差 (cm)
1	13.00	14.93	13.32
1/2	6.50	7.46	6.66
1/4	3.25	3.73	3.33
1/6	2.16	2.49	2.22
1/8	1.63	1.87	1.67
1/10	1.30	1.49	1.33
1/12	1.16	1.33	1.17
1/14	0.93	1.06	0.94

予測式より各基準点の標準偏差を 14 分の 1 まで小さくできれば 1cm の誤差になると予測される。

6.2 基準点の重心を抽出するプログラムの作成

基準点のレーザー座標は、レーザースキャナ付属のソフトを用いて反射強度より自動抽出される。レーザースキャナデータの基準点座標は、レーザースキャナ付属のソフトを用いて反射強度より自動取得される。しかし、表 6.1 であらわしたように Y 座標において最大で約 27cm と誤差のバラつきが大きく高精度で取得できているとは言えない。そこで、反射強度を用いて基準点の重心を算出するプログラム作成し、基準点の取得を行った。反射強度値が 100 以上の値の座標を用いた。また距離が近い基準点の場合には反射強度値が 150 以上の基準点を用いている。理由として、距離が近いもの基準点の場合だと反射強度値が 100 以上だとすぐ近くの物体が反射などにより反射強度値が 100 以上でまったく違う座標を読み込んでしまうためである。基準点の重心を計算する式は次式である。

$$U = \frac{\Sigma\ u_i k_i}{\Sigma\ k_i} \tag{6.1}$$

U:算出される U 座標
k:反射強度値

$$V = \frac{\Sigma\ v_i k_i}{\Sigma\ k_i} \tag{6.2}$$

V:算出される V 座標

$$W = \frac{\Sigma\ w_i k_i}{\Sigma\ k_i} \tag{6.3}$$

W:算出される w 座標

6.2.1 重心抽出プログラムによるレーザースキャナデータの基準点座標の取得

重心抽出プログラムにより取得した基準点の標準偏差を表 6.3 に示す。

表 6.3 重心抽出プログラムより取得した各プリズムの標準偏差

基準点	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)
1	3.87	0.70	1.37
2	0.58	1.00	0.64
3	1.22	2.07	2.05
4	1.07	2.97	2.14
5	2.18	3.60	4.34
6	1.42	2.61	1.68

重心抽出プログラムを用いた基準点の標準偏差は、レーザースキャナ付属のソフトよりも精度を向上させることができた。最大でも 13 分の 1 まで標準偏差を小さくできている。しかし、全ての基準点を 14 分の 1 以下まで小さくすることはできなかった。

6.2.2 重心抽出プログラムから取得された基準点を用いた座標変換後の検証点の誤差

重心抽出プログラムにより取得したプリズムの座標を用いた場合の座標変換行った。また複数の基準点を用いた場合も行った。検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差を表 6.5 に示す。また、自作プログラムを用いた場合と付属のソフトを用いた場合の誤差の比較図を図 6.1、6.2 に示す。

表 6.4: 重心抽出プログラムより取得した基準点を用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差（プリズム）

検証点	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	斜距離 (cm)	水平距離 (cm)
1	8.77	3.54	10.48	13.86	8.39
2	38.67	15.70	35.81	53.29	39.25
3	4.65	1.90	6.14	7.81	4.51
4	27.44	11.15	30.26	41.47	26.75
5	7.18	2.93	6.07	9.41	7.34
6	3.82	1.61	2.66	4.33	3.58

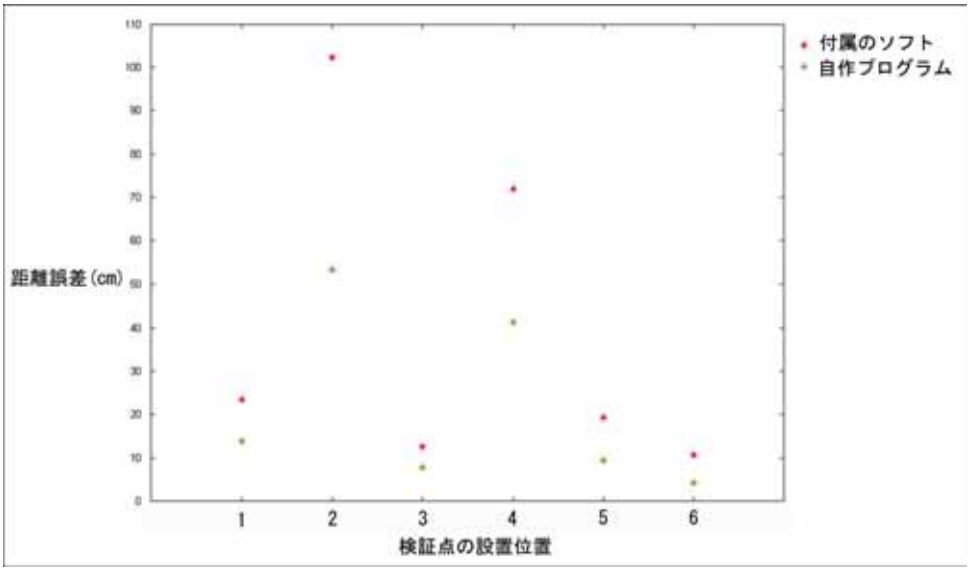

図 6.1 重心抽出プログラムと付属ソフトを用いた場合の誤差の比較 (プリズム)

表 6.5: 重心抽出プログラムより取得した基準点を用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差（複数の基準点）

検証点	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	斜距離 (cm)	水平距離 (cm)
1	2.38	2.44	5.39	6.34	3.15
2	1.08	2.01	1.39	2.46	1.89
3	3.51	0.88	1.63	3.84	3.49
4	1.43	0.97	2.13	2.59	1.58
5	2.78	1.70	3.63	4.69	3.05
6	3.19	1.29	2.50	3.69	2.66

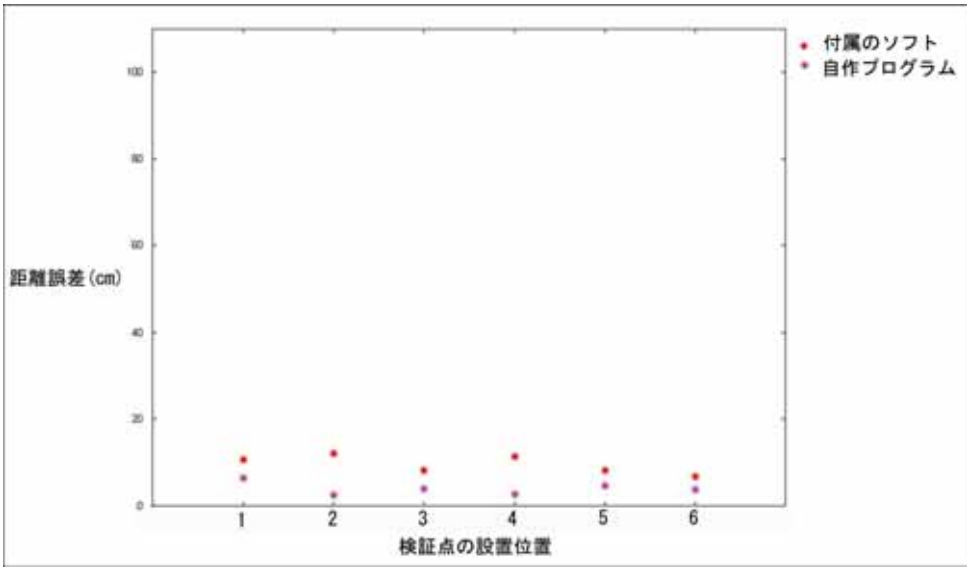

図 6.2 重心抽出プログラムと付属ソフトを用いた場合の誤差の比較 (複数の基準点)

付属のソフトを用いた基準点を使用するよりも重心抽出プログラムより取得した基準点を用いた座標変換は全ての検証点において精度が向上した。特に平均誤差距離が 102cm 以上あった検証点 2 に関して半分の 53.29cm にまで減少することができた。しかし、検証点 6 の平均距離誤差は 4.3cm と目標の 1cm の精度に達成することができていない。複数の基準点を使用した場合全ての検証点の平均距離誤差は 10cm 以下となった。また、最小の平均距離誤差は 2.59 まで下げることができている。

6.3 非線形の三次元アフィン変換手法

線形のアフィン変換の変換パラメータ (p_0〜p_8) は回転行列である。回転行列は、x 軸周りの回転を ω,y 軸周りの回転を φ,z 軸周りの回転を κ とすると次式で回転行列を表すことができる。

$$\begin{pmatrix} p_0 & p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 & p_5 \\ p_6 & p_7 & p_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\ \omega & -sin\ \omega \\ 0 & sin\ \omega & cos\ \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos\ \phi & 0 & sin\ \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\ \phi & 0 & cos\ \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos\ \kappa & -sin\ \kappa & 0 \\ sin\ \kappa & cos\ \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

と次式で表すことができる。未知数の個数は 6 個となり、最低の 2 個の基準点で変換式を決定できることになる。よって基準点が同じ個数でも未知数が少なくなることで見かけ的に多くなり精度が向上すると思われる。式 6.4 を最小二乗法を用いて解くが、三角関数が含まれているため、通常の連立方程式で解くことができない。したがって、テイラー展開を用いて逐次計算をすることにより近似値を求める。

6.3.1 非線形の三次元アフィン変換を用いた座標変換後の検証点の誤差

重心抽出プログラムにより取得した基準点を用いて非線形の三次元アフィン変換を行った。各検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差を表 6.6、6.7 に示す。また、線形と非線形の三次元アフィン変換を用いた場合の各平均距離誤差の比較図を図 6.3、6.4 に示す。

表 6.6 非線形の変換式を用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差（プリズム）

検証点	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	斜距離 (cm)	水平距離 (cm)
1	6.45	4.93	9.75	12.59	7.09
2	1.84	4.85	3.59	5.95	4.82
3	3.31	1.39	5.96	6.90	3.50
4	2.19	3.16	2.20	4.09	3.44
5	4.43	3.31	4.37	6.30	4.88
6	3.57	2.47	2.82	4.69	3.88

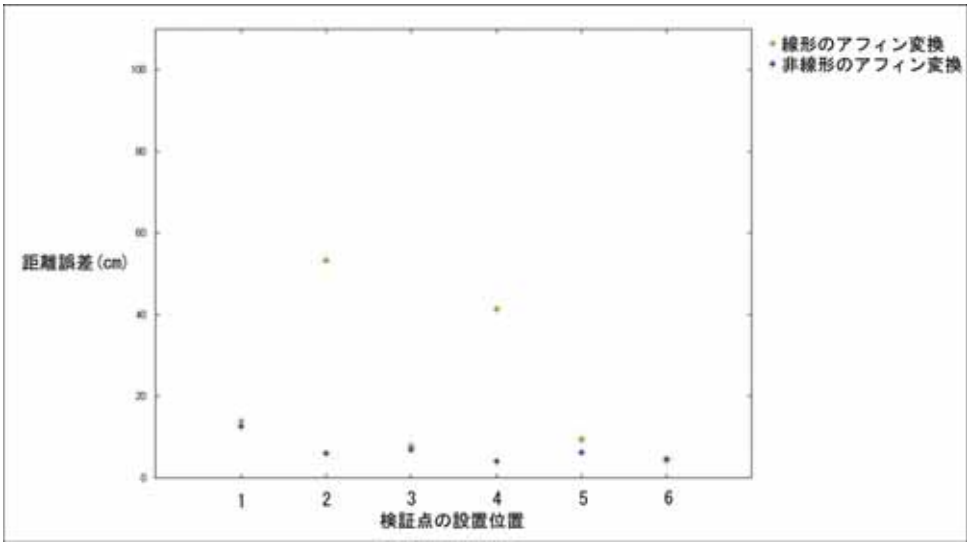

図 6.3 線形と非線形を用いた座標変換の誤差の比較 (プリズム)

表 6.7 非線形の変換式を用いて座標変換した検証点の平均二乗誤差と平均距離誤差 (複数の基準点)

検証点	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	斜距離 (cm)	水平距離 (cm)
1	3.52	4.52	9.52	11.08	5.08
2	2.14	3.73	3.69	5.51	4.01
3	3.31	1.39	5.96	6.90	3.28
4	2.24	3.96	1.92	4.61	4.13
5	4.97	3.86	5.65	7.75	5.65
6	3.07	2.94	2.29	4.40	3.82

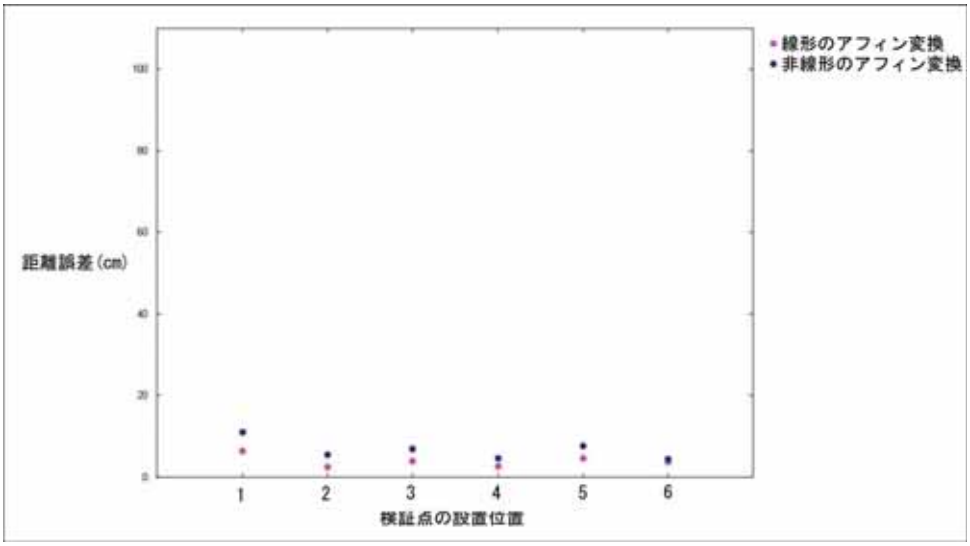

図 6.4 線形と非線形を用いた座標変換の誤差の比較 (複数の基準点)

非線形の三次元アフィン変換を行うことでプリズムを基準点に用いた場合、最も大きかった検証点 2 の平均距離誤差を 5.95cm まで小さくすることができた。検証点 6 では線形のアフィン変換とあまりかわらないという結果だった。複数の基準点を用いた場合、線形のアフィン変換よりも誤差は悪くなっていた。また、変換式をかえても精度が変わらない検証点もあった。理由として非線形の三次元アフィン変換を用いることで角度を詳しく計算させることができるが検証点の位置によって角度による誤差の要因がなかったのではないかと考えられる。こちらの手法を用いても目標精度 1cm を充たすことができなかった。

7　今後の精度向上のための提案

今回、重心抽出プログラムによる基準点の取得と変換式を非線形の三次元アフィン変換を用いたことで精度を向上させることができたが、目標精度である平均距離誤差 1cm を充たすことができなかった。そこで、目標精度を充たすための提案をここで挙げる。

7.1　複数回計測による誤差の低減

誤差がランダムな誤差であれば複数回計測で誤差を低減することができる。誤差が系統的な誤差であれば、座標変換後の誤差シミュレーションを作成し、系統的な誤差の傾向を把握できれば、要因の解明、補正を行うことができる。補正ができれば複数回計測を行うことが可能である。誤差伝播の法則により複数回計測における誤差の予測を行い、何回測量を行えば平均距離誤差を 1cm 以下にできるのかを検討した。誤差伝播の法則により複数回計測における誤差の予測式を式 7.1 に示す。

$$E = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{7.1}$$

E:予測される誤差

σ:計測誤差

測定回数:測定回数

プリズム 5 台を基準点に用いた場合とプリズムと反射板を基準点に用いた場合の各検証点の複数回計測における誤差を図 7.1 から図 7.12 に示す。

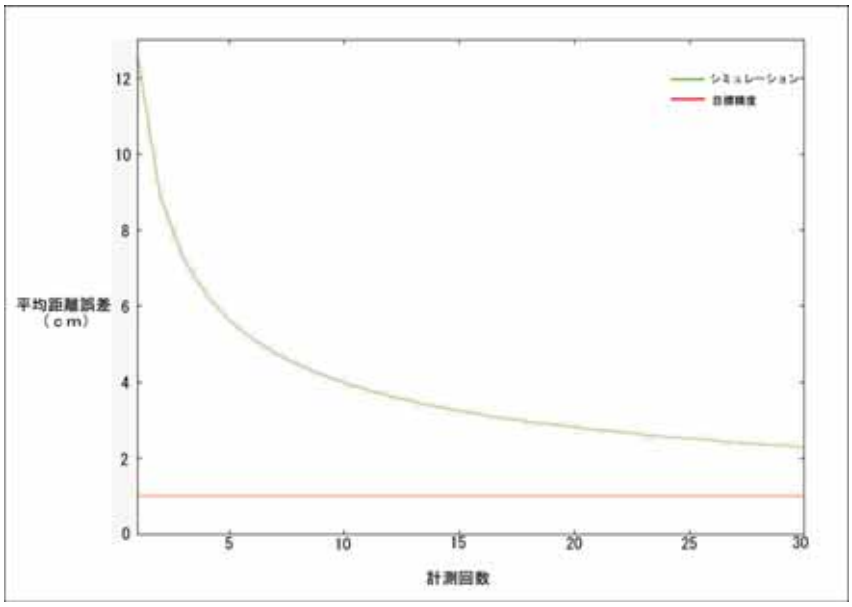

図 7.1 複数回計測による検証点 1 の予測誤差 (基準点：プリズム)

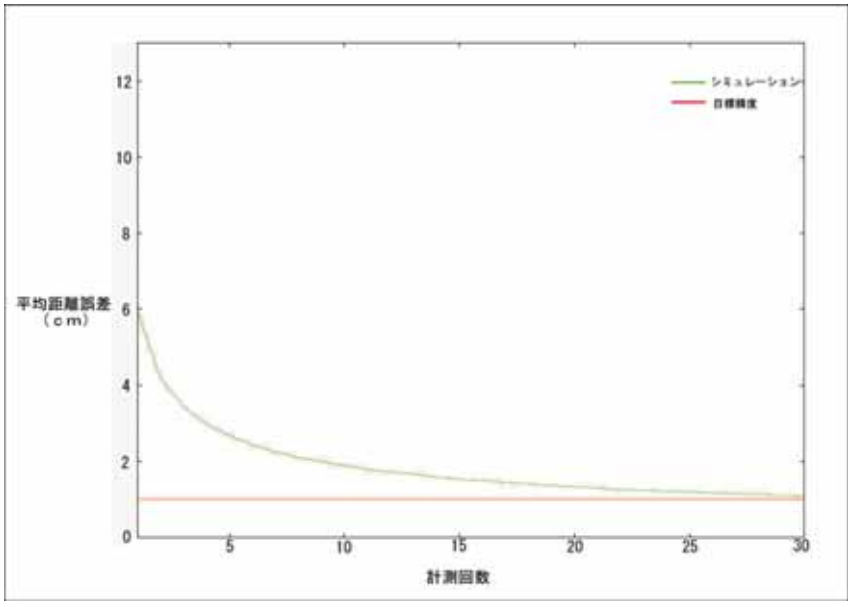

図 7.2 複数回計測による検証点 2 の予測誤差 (基準点：プリズム)

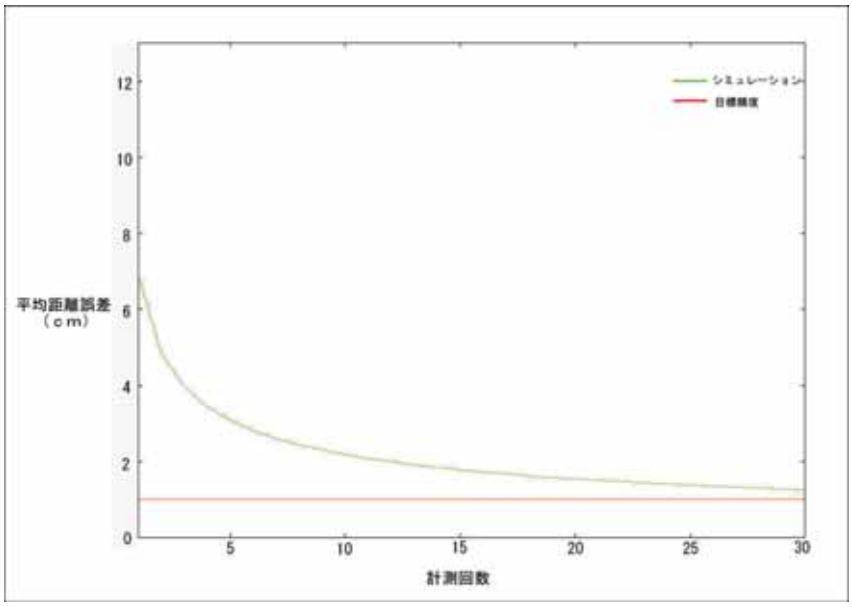

図 7.3 複数回計測による検証点 3 の予測誤差 (基準点：プリズム)

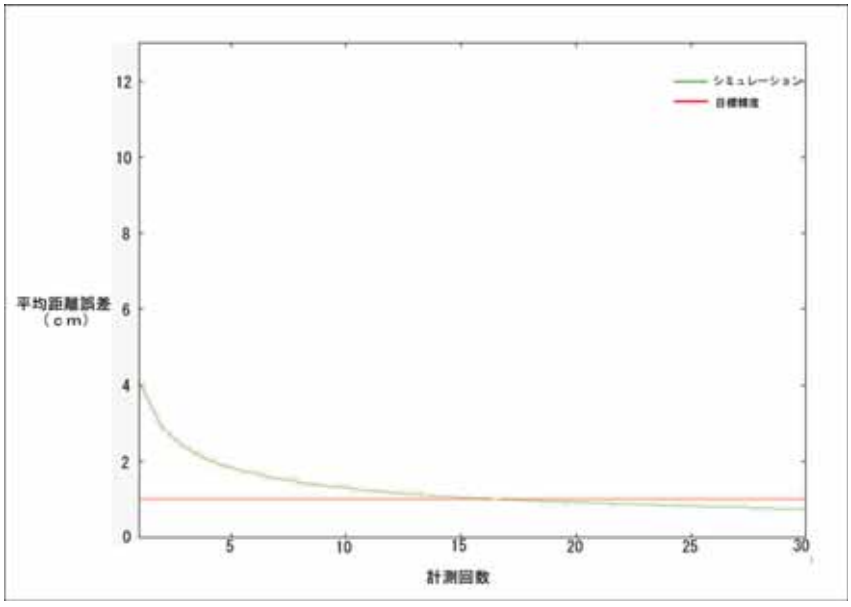

図 7.4 複数回計測による検証点 4 の予測誤差 (基準点：プリズム)

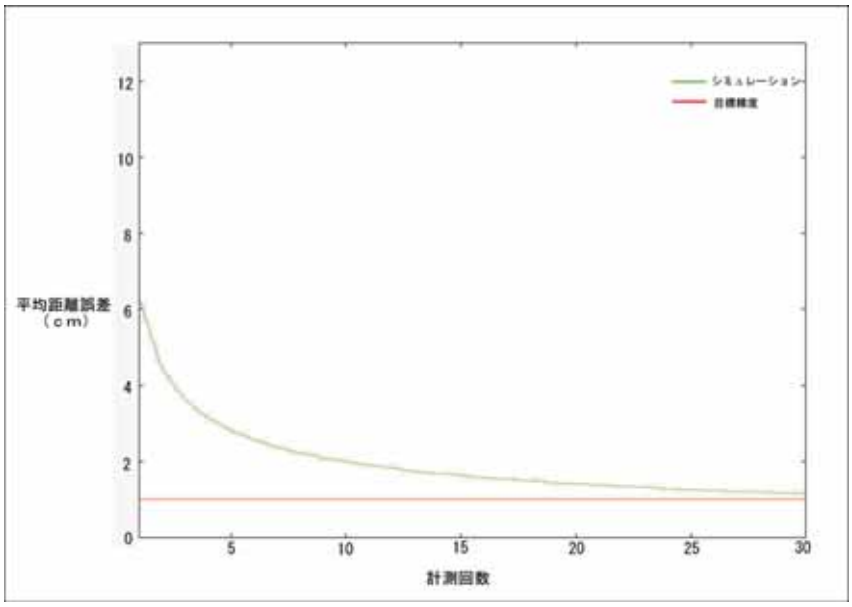

図 7.5 複数回計測による検証点 5 の予測誤差 (基準点：プリズム)

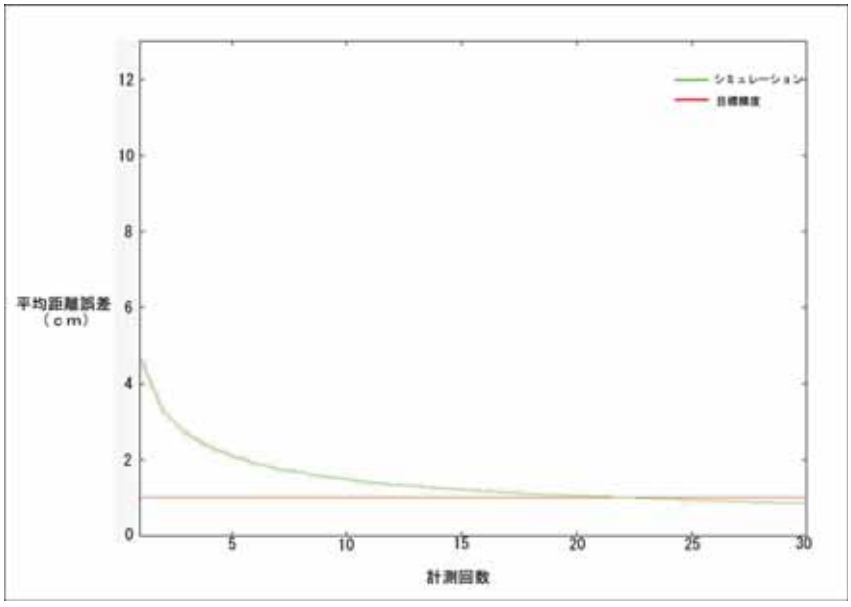

図 7.6 複数回計測による検証点 6 の予測誤差 (基準点：プリズム)

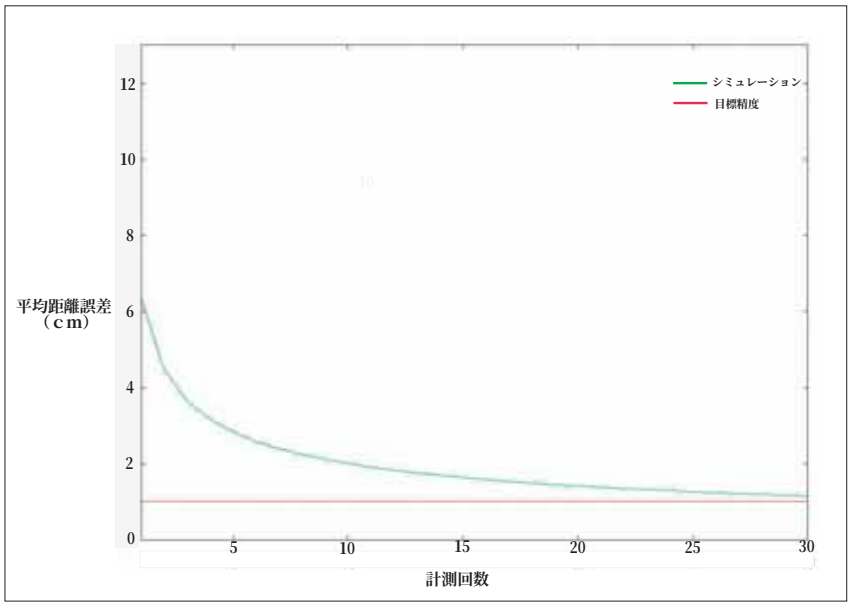

図 7.7 複数回計測による検証点 1 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板)

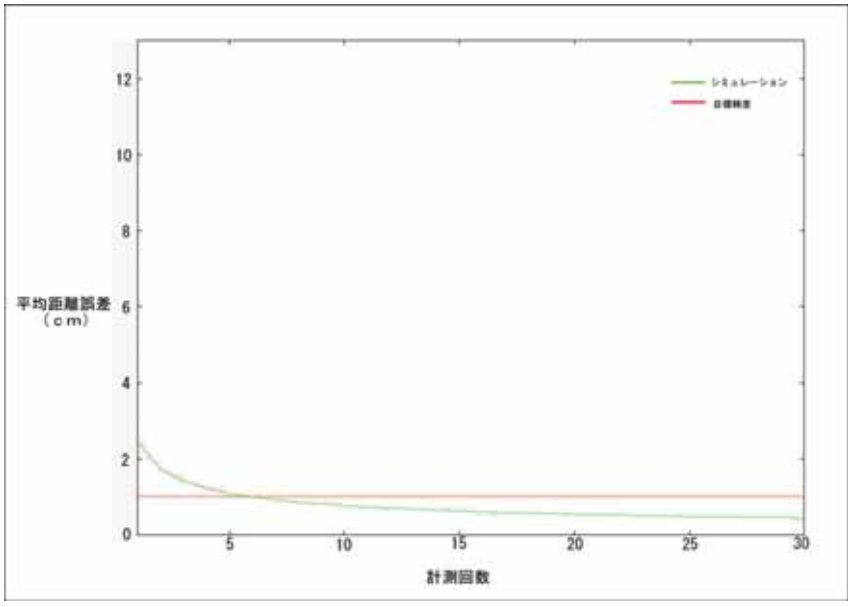

図 7.8 複数回計測による検証点 2 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板)

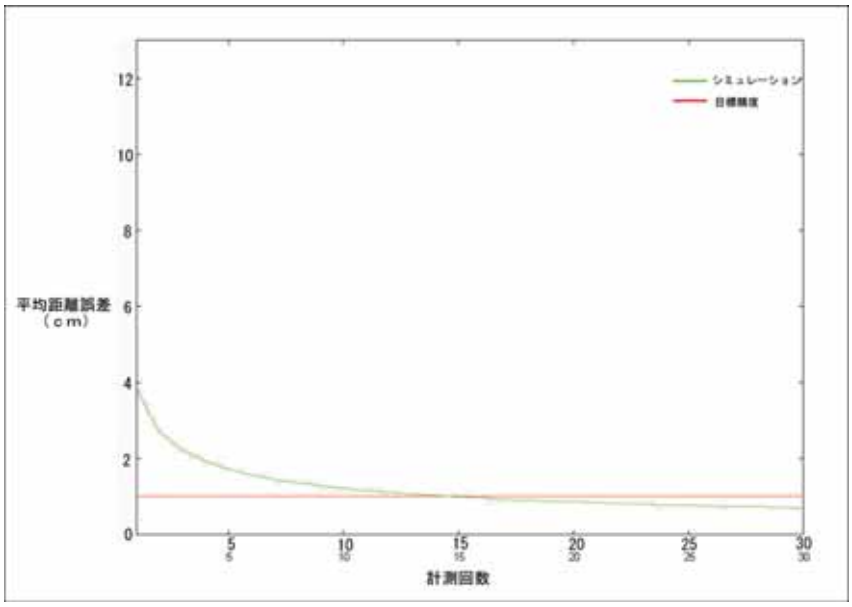

図 7.9 複数回計測による検証点 3 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板)

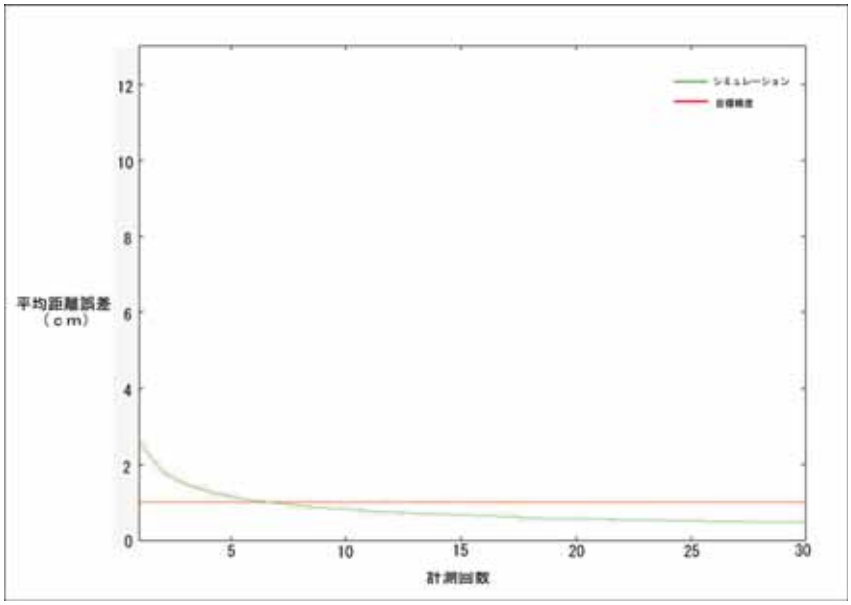

図 7.10 複数回計測による検証点 4 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板)

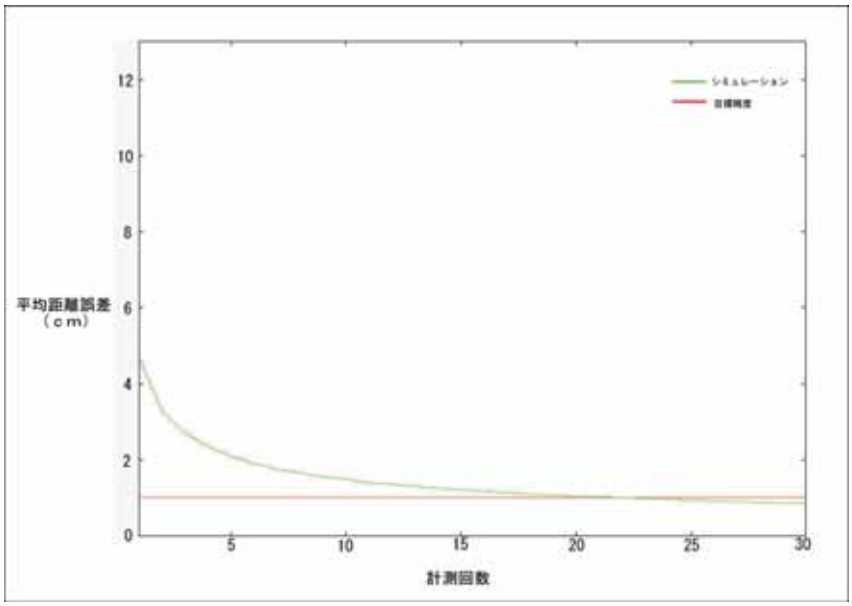

図 7.11 複数回計測による検証点 5 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板)

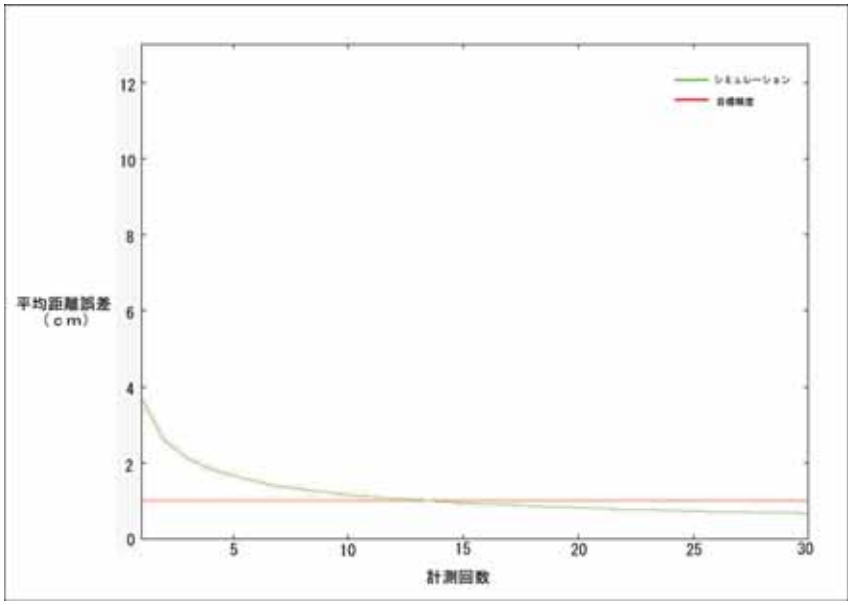

図 7.12 複数回計測による検証点 6 の予測誤差 (基準点：プリズムと反射板)

複数回計測の予測式より、プリズムと反射板を用いた基準点の場合では地すべり地内に設置されている検証点 6 の精度を目標精度 1cm にするためには最低でも 14 回行う必要があり、プリズムの場合でも 22 回計測を行う必要がる。全体の検証点の精度を 1cm にするためにはプリズムと反射板では 41 回、プリズムでは 159 回の計測が必要になってくる。問題点としてレーザースキャナは 1 回の計測に約 15 分時間がかかるため 14 回の計測でも 3 時間半の時間がかかってしまう。

8　結論

本研究の目的である座標変換時の平均距離誤差 1cm にすることはできなかった。しかし、基準点座標の標準偏差を付属のソフトを用いた取得方法よりも高精度で取得することができるようになった。座標変換後の平均距離後が検証点 2 において距離誤差 102.26cm あったものが基準点の重心抽出プログラムを用いることで 5.95cm まで減少することができた。同じ数のプリズムと反射板を比較した場合、広範囲の座標変換をする場合はプリズムを基準点に用いたほうが精度は良くなる。反射板もプリズムと同じように幅広く設置することができれば、精度は高いと思われるが設置距離が決まっているため、広範囲の三次元データを高精度に座標変換するには適していないと思われる。しかし、検証点が反射板の設置距離内にあるとすれば精度はプリズムよりも良くなる。また、プリズムよりも安価であることから、大量に設置することで、プリズムと反射板を合わせた座標変換を行った場合、精度は向上するだろう。

また、座標変換後の誤差のシミュレーションを作成し、系統的な誤差の要因を解明し、補正を行い、複数回計測を行うことで更なる高精度化が期待できる。

参考文献

1) 中村英夫・清水英範　共著、「測量学」技法堂出版
2) 坂井知也・高木方隆、「レーザースキャナを用いた平面計測における誤差分布モデルの構築」、高知工科大学大学院 2005 年度修士論文
3) 木下和・高木方隆、「レーザースキャナデータの高精度幾何補正手法の開発」、高知工科大学大学院 2007 年度修士論文
4) リーグルジャパン　、「LMS-Z210 取扱説明書」

謝辞

本研究の機会を与えてくださり、様々な有益なご指導していただいた高知工科大学社会システム工学科の高木方隆教授には心から感謝いたします。また、本研究の副指導教員をしていただき、ご助言して下さいました社会システム工学科の野尻洋一教授に心から感謝いたします。日頃から研究及び英語などのご助言をして下さいました Kyaw Sann Oo さん、誠にありがとうございました。貴重な時間を割いて観測に協力してくれた中川享洋君、小島光博君、石田圭佑君、稲田涼君、宇多幸司君、柏木伸哉君、篠原尚平君、田内雅也君、高関良君、誠にありがとうございました。特に同期として、色々とお世話になった中川享洋君に改めて感謝いたします。また、同じ計測機器を用いた研究であり、何度も計測に協力してくれた稲田涼君、宇多幸司君に感謝します。最後に影ながら支えてくれた家族と友人に心より感謝します。